

El por qué de los sensores de humedad en las cosechadoras de grano

Lola Vázquez , Myriam Wetzel ,Adolfo Moya , Belén Diezma

En este artículo se refleja la importancia del contenido en humedad del grano por su incidencia en la calidad y manejo del producto. Se exponen las posibles tecnologías disponibles para su estimación y las soluciones actualmente implementadas en cosechadoras de grano.

POR QUÉ MEDIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS

La calidad de los granos está determinada por las características físicas de los mismos, su composición química y las propiedades funcionales de sus componentes. Si conceptualmente se entiende por calidad la aptitud de un producto para determinado fin, se desprende de esta definición que no siempre se buscarán los mismos atributos de un lote de granos, dado que no siempre se destinará a un mismo uso (Giambastiani *et al.*, 2002). En la Tabla 1 se enumeran una serie de cualidades que resultan deseables que reúna un lote de granos de cereales y oleaginosas según los destinos del producto. La nula o muy baja presencia de elementos extraños (otras semillas, granzas, etc) es, lógicamente otro de los parámetros de calidad deseable ya que estos elementos pueden interferir con la propiedades (nutritivas, organolépticas, tecnológicas, etc) del grano cosechado.

El contenido en humedad de los granos, cuyos efectos y técnicas de medida abordamos en este artículo, es una de las características más determinantes en su calidad.

Por una parte afecta a las propiedades físicas y mecánicas del grano y con ello a todos los procesos de recolección

Tabla 1. Principales atributos de calidad de los granos. Fuente: Giambastiani et al., 2002.	
Atributo de calidad	Destino producto
Contenido en humedad bajo y uniforme	Todos
Baja proporción de granos dañados	
Baja susceptibilidad al quebrado	
Alto peso específico	Molinería
Alto rendimiento en almidón	
Alta extracción de aceite	
Alta calidad de proteínas	Semillas
Alta viabilidad	
Bajo contenido en hongos	Fabricación alimentos
Alto valor nutritivo	

Tabla 2. Efecto del aumento del contenido en humedad en las propiedades físicas y mecánicas de granos de trigo y haba.			
		Trigo verde	Haba (Vicia faba L.)
Propiedades Físicas	Volumen	↑	↑
	Peso	↑	↑
	Densidad	↓	↑
	Porosidad	↓	↑
	Esfericidad	↑	↑
Propiedades Mecánicas	Deformación en ruptura	-	↑
	Fuerza de ruptura	-	↓
	Coefficientes de fricción estática	↑	↑

mecanizada, transporte, almacenaje e industrialización.

Un aspecto clave en el manejo de granos son las posibles infecciones por microorganismos, que alteran sus características y que en algunos casos producen toxinas que podrían afectar al consumidor final (hombre o animal). En este punto es interesante conocer la relación existente entre el contenido en humedad del grano y la actividad del agua disponible y consecuentemente la disponibilidad de agua para los microorganismos y los factores que influyen en esta relación, entre los que destaca la temperatura.

Esto determina que existan unos rangos de humedad óptimos para el transporte y almacenaje de los granos que son aceptados por el mercado por lo que los granos con contenidos en humedad superiores a los especificados deben pasar por secaderos con el consiguiente coste energético y económico.

Por tanto, realizar mediciones rápidas, precisas y representativas del contenido en humedad es un objetivo que se viene persiguiendo en las tareas de recolección, procesado y almacenamiento de los granos y semillas; especialmente en las primeras ya que el secado durante la maduración en la planta no conlleva coste energético. En este artículo se presentan varios sensores para la determinación de la humedad de los granos basados en diferentes principios de funcionamiento, algunos de ellos en fase de investigación y otros ya plenamente implementados en las máquinas cosechadoras.

EFFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS GRANOS

En este apartado se recogen los principales resultados que trabajos recientes (Kalkan *et al.*, 2011; Al-Mahasneh *et al.*, 2007; Altuntas *et al.*, 2007) han obtenido en el análisis del efecto que el contenido en humedad de los granos produce sobre las propiedades mecánicas y físicas. Se introducen las conclusiones obtenidas sobre dos tipos de grano: trigo y haba. En la Tabla 2 se incluyen los parámetros físicos y mecánicos medidos y su variación con el aumento de humedad. La variación de las dimensiones del grano, la densidad, la porosidad y el coeficiente de fricción con el contenido de agua tiene repercusiones sobre el diseño de los equipos de recolección y manejo:

- las dimensiones del grano en la selección de los tamices separadores, en el diseño de los procesos de secado, aireación, refrigeración y calefacción.
- la densidad y porosidad en el modelado de las tolvas y las instalaciones de almacenamiento.
- el coeficiente de fricción entre el grano y la superficie en contacto con los granos, en el diseño y los materiales de los elementos de las cosechadoras y de los equipos de trasiego.

Los experimentos realizados (Tabla 1 y tabla 2) por Kalkan, 2011; Al-Mahasneh, 2007; Altuntas, 2007 demostraron que al aumentar el contenido de humedad, la dimensión del grano de trigo y haba aumenta en los dos casos, la densidad y porosidad del grano de trigo disminuyen mientras que estos parámetros aumentan en el caso del grano del haba. El coeficiente de fricción de los dos diferentes granos aumenta.

RELACIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD CON LA ACTIVIDAD DEL AGUA Y LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La proliferación de microorganismos en los granos

Figura 1. Contenido en humedad de granos de maíz durante el proceso de maduración. Fuente: Maiorano et al., 2010.

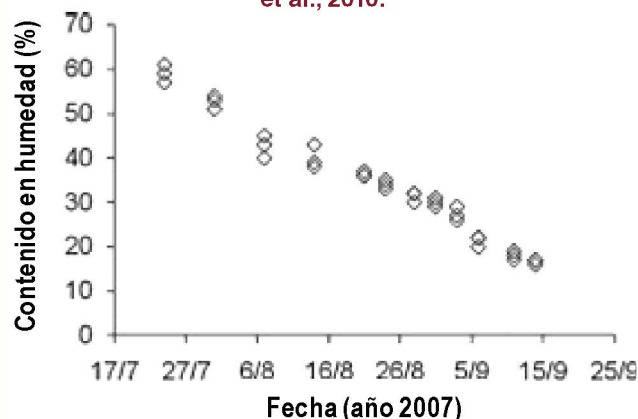


Figura 2. Evolución de la actividad del agua durante el proceso de maduración. Fuente: Maiorano et al., 2010.

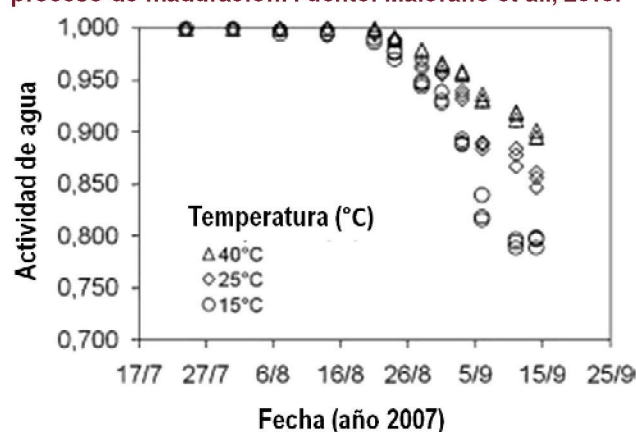
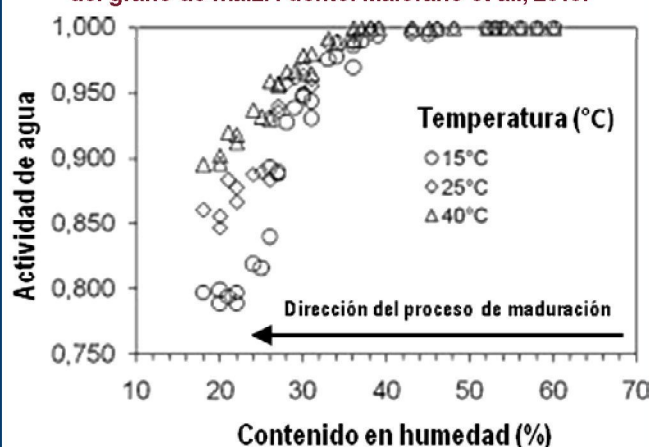


Figura 3. Relación actividad del agua y humedad del grano a 3 temperaturas (15, 25, 40°C) durante la maduración del grano de maíz. Fuente: Maiorano et al., 2010.



depende directamente del agua disponible, esto es, de la actividad de agua en el grano, relacionada con el contenido en humedad de éste pero corregida por otros

parámetros, entre los que destaca la temperatura. Para comprender mejor las condiciones en las cuales los microorganismos se desarrollan, se reseña a continuación una investigación (Maiorano *et al.*, 2011) centrada en el seguimiento del contenido en humedad y la actividad del agua en un híbrido comercial de maíz durante la fase de maduración y en el establecimiento de las relaciones existentes entre ambos parámetros y la temperatura.

En el ciclo del maíz, de 40 a 50 días después de la floración se produce la maduración fisiológica, con aproximadamente un 37% de humedad en el grano. Desde este momento el grano deja de ganar materia seca y comienza a perder humedad, hasta llegar a niveles compatibles con la cosecha mecánica (25-18%). El contenido en humedad es un parámetro fácil de determinar, por lo que es el más común para describir el progreso del proceso de maduración; sin embargo, no describe suficientemente el agua disponible para el crecimiento de hongos y otros microorganismos. La actividad de agua (a_w) es una medida de esa disponibilidad y es expresada como la relación entre la presión de vapor de agua en el sustrato y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura; varía entre 0 (no hay agua) y 1 (agua pura). La a_w más baja que permite el crecimiento de la mayoría de los microorganismos está alrededor de 0,60, en 0,86 para el crecimiento de bacterias patógenas y en 0,78 para el crecimiento de hongos micotoxigénicos.

En los ensayos realizados por Maiorano (2010) se midió el contenido en humedad del grano en el tiempo y la actividad del agua a tres temperaturas distintas. Como se puede apreciar en las graficas adjuntas (Fig. 1 y 2), se ha observado que mientras el contenido en humedad decrece de forma lineal durante la maduración, la actividad de agua no lo hace hasta el último periodo.

Eso hace que las condiciones sean favorables para el desarrollo de los microorganismos hasta la última etapa de maduración del grano. Los microorganismos que se desarrollan con más frecuencia son *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*.

En la Figura 3 se representa la evolución y actividad de agua a lo largo del proceso de maduración. Se observa que para igual contenido en humedad cuanto más alta es la temperatura (hasta 40°C), mayor es la actividad de agua en el grano. Este efecto es más acusado cuanto más bajo es el contenido en humedad. Esto tiene una influencia decisiva en el manejo del grano almacenado, ya que para un contenido en humedad del grano, existen temperaturas críticas por encima de las cuales pueden alcanzarse a_w que

Figura 4. Vista exterior (arriba) e interior (abajo) del sensor de humedad del grano para instalación en las series CX y CR de cosechadoras New Holland. Fuente: New Holland.

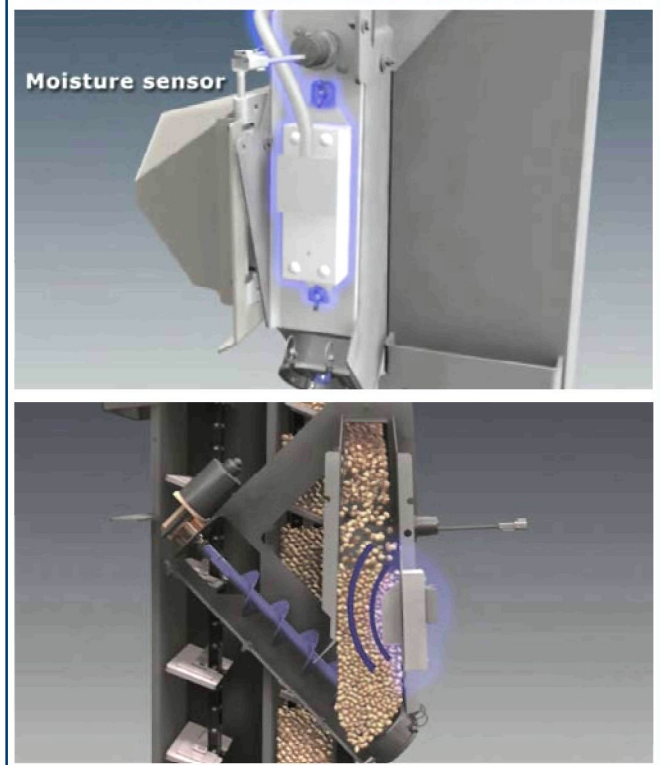
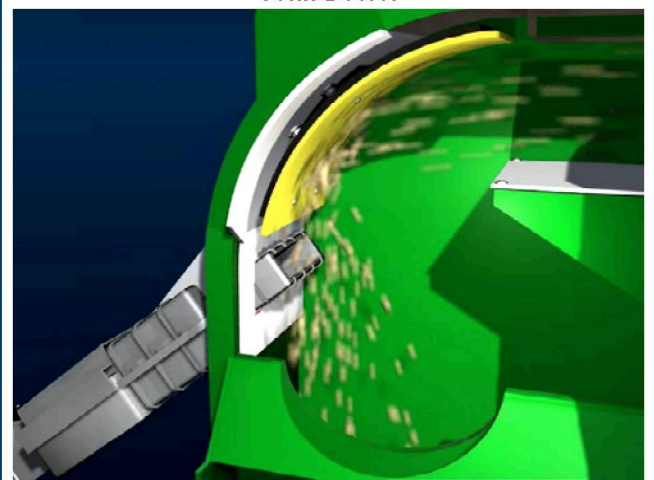


Figura 5. Sensor de humedad del grano de las cosechadoras John Deere situado en el tanque de grano, incorpora un sensor de temperatura. Fuente: John Deere.



permitan la proliferación de microorganismos.

Una mejor comprensión de la relación contenido - actividad de agua y la influencia de la temperatura sobre esa relación podría resultar en un mejor entendimiento del desarrollo de los microorganismos que crecen en el grano y que producen toxinas. Consecuentemente, esta relación es un factor importante a tener en cuenta

en la calidad de la cosecha del grano.

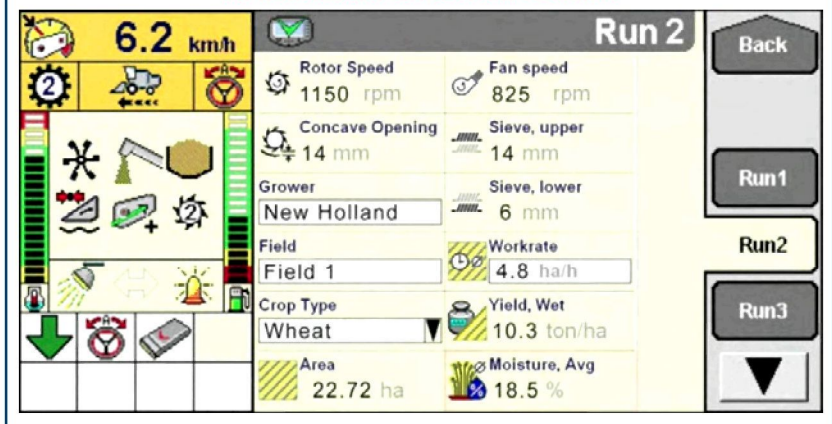
EQUIPOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD

Durante las últimas décadas se han llevado a cabo investigaciones dirigidas al desarrollo de sensores para la determinación rápida y precisa del contenido en humedad de los granos de cereales. Las técnicas ensayadas comprenden las micro-ondas, los métodos basados en las propiedades dieléctricas (capacitancia e impedancia), la espectrometría en el infrarrojo cercano (NIR, entre 700 y 2400 nm, región donde los grupos funcionales C-H, N-H, y O-H absorben energía de manera que resulta idónea para cuantificar distintas formas de carbono, nitrógeno y agua respectivamente.) e incluso sensores acústicos.

SENSORES ACTUALMENTE IMPLEMENTADOS EN LAS COSECHADORAS DE GRANO

La solución adoptada por la mayor parte de los fabricantes de cosechadoras para la determinación de la hu-

Figura 6. Monitor de cosechadora de grano con información sobre los parámetros de funcionamiento, incluyendo la medida del contenido en humedad. Fuente: New Holland.



medad del grano en tiempo real es el empleo de sensores capacitivos.

Los sensores capacitivos empleados en las cosechadoras están constituidos por dos placas separadas por un material dieléctrico (no conductor). Ante una excitación eléctrica se producen variaciones en la capacitancia que se traducen en una señal de salida. Como las dimensiones y señal de excitación son fijas, las variaciones en capacitancia

y por lo tanto en la señal obtenida serán debidas a las propiedades dieléctricas del material situado entre las placas. De esta forma la señal obtenida varía en función de la humedad del grano situado entre las dos placas.

Los sensores de humedad del grano se sitúan en el elevador de grano limpio o en el sinfín alimentador de la tolva (Fig. 4 y 5).

Habitualmente se instalan junto al sensor de rendimiento o de flujo ya que las informaciones de rendimiento y humedad son requeridas conjuntamente. El diseño de los sensores permite la medición periódica de muestras del grano cosechado. Para esto, el sistema permite la entrada al sensor de una parte del grano limpio elevado para, una vez realizada la medida, devolverlo al flujo principal (mediante un pistón, un pequeño sinfín u otro sistema) y volver a comenzar el proceso. El diseño de estos sistemas es relevante ya que deben asegurar un correcto muestreo del grano sin entorpecer su flujo hacia la tolva, que podría provocar atascos.

Los sensores de humedad vierten su información a la línea CAN de la cosechadora por lo que su información es directamente visualizada en el monitor de rendimiento (Fig. 6) y puede ser combinada y registrada con la información de posicionamiento para la posterior elaboración de mapas de humedad. Las posibilidades de empleo de los datos obtenidos dependen de las soluciones para la agricultura de precisión implementadas en la cosechadora.

Los sensores de humedad deben ser calibrados para los diferentes tipos de grano, normalmente las marcas incluyen calibraciones previas para los granos más comúnmente cosechados, pero permiten llevar a cabo un ajuste de la calibración del sensor por parte del operador mediante el monitor de rendimiento. La precisión en la determinación es mayor cuanto mayor es la superficie de las placas y más reducida la separación entre ellas. La precisión alcanzada por estos sistemas se cifra en un $\pm 1\%$ y realizan una determinación cada 10 ó 20 segundos.

Hoy en día las marcas ofrecen la preinstalación para

Figura 7. Componentes y diseño del sensor acústico. Fuente: Amoodeh et al., 2006.

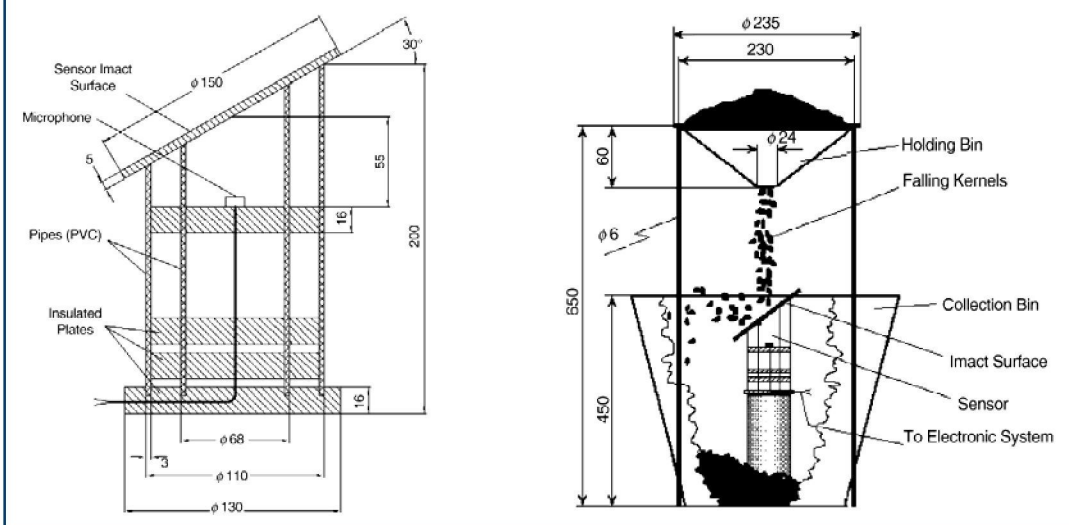
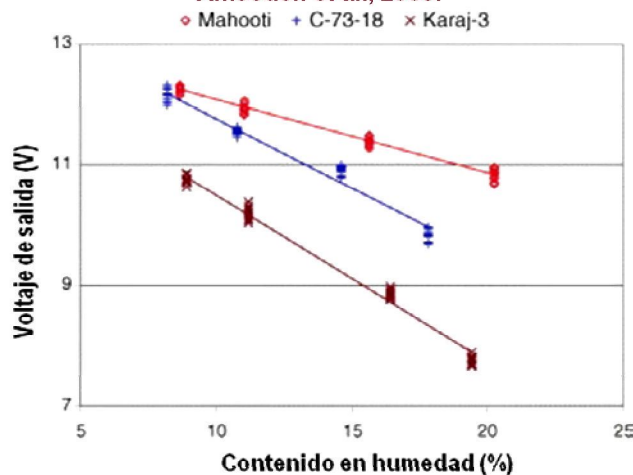


Figura 8. Relación entre el contenido de humedad del grano correspondiente a tres variedades de trigo y el parámetro de salida del dispositivo acústico. Fuente: Amoodeh et al., 2006.



el montaje de los sensores de rendimiento y humedad en toda su gama media y alta, y en algunos casos también en cosechadoras de gama baja. Su montaje muy comúnmente está asociado al del sensor de rendimiento y suele estar disponible en paquetes de agricultura de precisión o puede incluirse como opción en la adquisición de una nueva cosechadora. Si ya disponemos de una cosechadora y queremos instalar los sensores de humedad o de rendimiento deberemos invertir de 2.000 a 3.000 euros en ello.

OTRA TECNOLOGÍA EN INVESTIGACIÓN: LOS MÉTODOS ACÚSTICOS

En un intento de ofrecer sensores precisos, de bajo coste y versátiles para su utilización durante la

recolección, el manejo y el almacenamiento, se han desarrollado trabajos centrados en las propiedades acústicas de los granos y su relación con las propiedades elásticas de los mismos según diferentes contenidos en humedad (Amoodeh *et al.*, 2006). En uno de estos trabajos se ha desarrollado un sencillo dispositivo, probado en laboratorio y que consiste en un micrófono que recoge la onda sonora que generan los granos al impactar contra una superficie rígida de características definidas.

El diseño que ha obtenido mejores resultados cuenta con una conducción que asegura un flujo continuo de granos de aproximadamente 70 cm³/s (Fig. 7) sobre una superficie de vidrio inclinada. Bajo la superficie se sitúa el micrófono tan próximo como sea posible a la misma para obtener el mayor valor de la onda sonora sin que sea afectado por el deslizamiento de los granos sobre la superficie. El sensor se encuentra aislado mediante dos carcasas cilíndricas de PVC, lo que asegura que señales acústicas inferiores a 90 dB no afectan a la medida, lo que permite afirmar a los autores que el sistema podría operar en industrias de procesamiento con condiciones de elevado ruido ambiental; no se hacen valoraciones de su adecuación a maquinaria de recolección.

El prototipo se ensayó en tres variedades de trigo con un error instrumental máximo del 1,25% para un rango de contenido en humedad de entre 8 y 20%. Aunque los niveles de error son comparables a los obtenidos con los sistemas comerciales actualmente, el hecho de que cada variedad requiriera una calibración específica hace el sistema poco robusto y muy dependiente de las propiedades elásticas de los granos (Fig.8).

A MODO DE CONCLUSIÓN

Es obvio que un mejor conocimiento de las características de los granos supone potenciales mejoras en su manejo durante la recolección y el almacenamiento, redundando en disminución de pérdidas y garantías de calidad y seguridad alimentaria. Las capacidades crecientes y el

abaratamiento de la sensórica combinados con los precisos sistemas de posicionamiento global parecen ser las herramientas naturales para alcanzar las mencionadas mejoras.

Nuestra opinión es que el mercado de la recolección de grano en España continuará con su profesionalización y que el empleo de nuevos sensores que aporten una mayor información y valor añadido a los agricultores y compradores de grano se extenderá con el tiempo. La tecnología NIR, actualmente empleada en cosechadoras de forraje permite la determinación tanto de la humedad como de otros parámetros de calidad como proteínas o grasas por lo que resulta esperable que superados problemas de estabilidad y coste de la tecnología este tipo de sensores sustituyan a los actuales en un futuro.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Mahasneh, Majdi A., and Taha M. Rababah. 2007. Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering* 79 (4):1467-1473.
- Altuntas, Ebubekir, and Mehmet. 2007. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. *Journal of Food Engineering* 78 (1):174-183.
- Amoodeh, M. T., M. H. Khoshtaghaza, and S. Minaei. 2006. Acoustic on-line grain moisture meter. *Computers and Electronics in Agriculture* 52 (1-2):71-78.
- Giambastiani, G., and Rubiolo, O. 2002. Efecto del almacenaje y el secado sobre la calidad de los granos. Facultad Ciencias Agropecuarias. Universidad de Córdoba (Argentina).
- Kalkan, F., and M. Kara. 2011. Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technology* 213 (1-3):116-122.
- Maiorano, Andrea, and Mattia Ciro Mancini. 2010. Water relationships and temperature interactions in maize grain during maturation. *Field Crops Research* 119 (2-3):304-307.